

地域の自然が保有する気候緩和効果を 活かした都市環境の再生手法

東北大学 教授 持田灯

概要：

本研究では、海風や河川、緑地などの地域の自然が持つ気候緩和効果を活用した都市環境の再生手法の提案を目的としている。そのためにはまず、地域が保有する気候緩和効果の実態の把握が必要となる。そこで本研究では気象観測データと気候数値解析技術を利用し各地域の自然が持つ環境ポテンシャルを定量的に評価した。また実測と被験者アンケート調査から緑陰や河川が人間の温冷感に及ぼす影響を明らかにした。最後にこれら環境ポテンシャルを積極的に利用すべき地区を MAP 化し、その利用手法の検討を行った。

キーワード： 熱収支分析 海風 広瀬川 風の道

1. はじめに

近年大きな問題となっている都市部のヒートアイランド対策として緑化、海風・河川風などの環境ポテンシャル(環境改善効果)の利用が注目を集めている。このような各地域の自然が持つ環境ポテンシャルを有効に利用することにより自然の持つ気候緩和効果を最大限に活用した自然と都市空間が融合する都市構造への転換が可能となる。本稿では気候数値解析、温熱環境測定により明らかになった地域が保有する環境ポテンシャルの実態と、都市環境再生のための環境ポテンシャルの有効利用手法について検討した内容を報告する。

2. 仙台を対象とした気候数値解析と熱収支分析に基づいた風通しの向上推奨地区 MAP の作成

(1) 熱収支分析の概要

本研究はメソスケール気候数値解析を実施することで、仙台市の気温低減ポテンシャルの定量的な評価を行った。夏季の気候数値解析は図1に示すような領域で3段階ネスティング手法を用いており、最小Grid (Grid3) で仙台市をクローズアップして解析を行っている。なお、図1

中の数値は解析で設定した海水面温度である。

さらに本研究ではこの気候数値解析結果を用いて都市への流入熱、流出熱、発熱、蓄熱を考慮した都市域全体の熱収支を評価している。具体的には、都市全体の熱収支を都市の熱収支モデルとして提案^{文1)文2)}、気候数値解析結果を用いて評価する。このモデルを用いて都市域全体での熱収支を考えることができれば、各ヒートアイランド対策の有効性の評価や各地域の特性に応じた優先順位付けが可能となる。本研究で提案する手法は、都市の熱環境をターゲットとして、都市域内での熱に関するフローと構造を評価するものである。図2に示すように都市を仮定の閉空間領域 (Control Volume、以下 C.V.) と考えた場合に、その C.V.内に流入する熱、発熱、蓄熱の収支を、ここでは都市の「熱収支モデル」と呼ぶ。

(2) 風通しの向上推奨地区の選定

(a) 夏季に海風により気温低下が期待できる地域

仙台の典型的な夏季晴天日の日中 (12~15 時) における移流による顕熱収支量が負となり、かつ全顕熱収支量 (移流成分、乱流拡散成分の顕熱収支量と人工排熱の顕

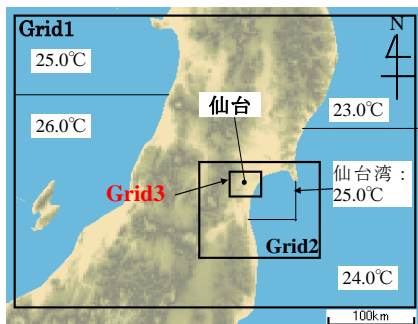


図1 解析領域

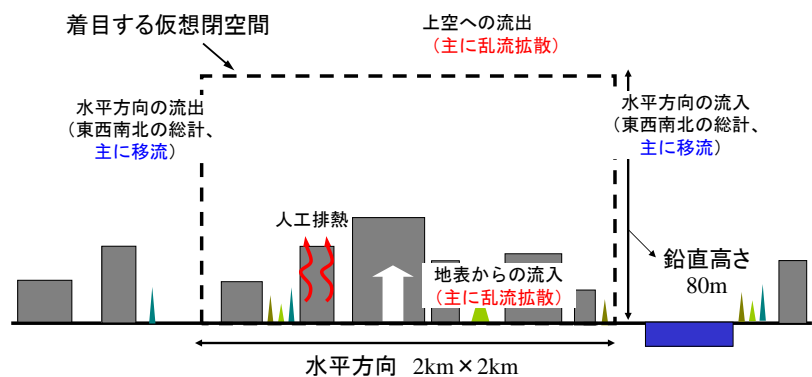


図2 熱収支分析の概念図

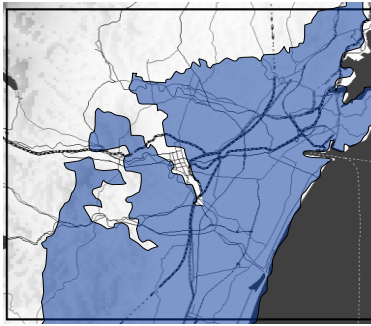


図3 夏季に海風により気温低下が期待できる地区



図4 冬季に季節風により気温低下が懸念される地区

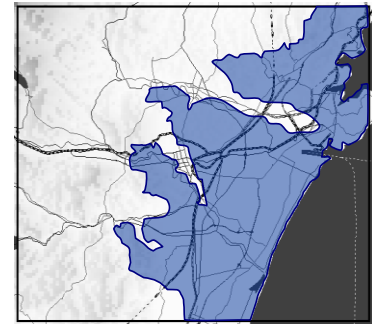


図5 海風の有効利用が推奨される地区

熱発生量の総和)の時間平均値が負になる地区を図3に示す。図3に示す領域では夏季の日中に海風による気温低下が都市内の発熱に勝っている地域である。従ってこれらの地域では海風の進入を阻害しないように建物配置等を規制するといった対策が効果的であると言える。

(b) 冬季の季節風により気温低下が懸念される地域

しかし、このような対策は気温上昇が問題となる夏季にとってはメリットがあるが、気温低下が問題となる冬季にとってはデメリットとなる。すなわち、風通しをよくすることで冬季の冷たい季節風まで呼び込むことになり、冬季における気温低下を助長する結果となり得る。そこで夏季と同様に、冬季において移流による顕熱収支量が負となり、かつ全顕熱収支量も負となる領域(図4)を、冬季の季節風により気温低下が懸念される地域として抽出し、これらの地域を図3の領域から除外して、最終的に「海風の有効利用が推奨される地区」として選定した(図5)。すなわち「海風の有効利用が推奨される地区」は、夏季に海風により気温低下が期待できるが、冬季の季節風により気温が低下しない地域と言える。

3. 広瀬川を対象とした温熱環境測定

前節ではメソスケール気候数値解析を応用した熱収支分析により、海風を効果的に利用するためのMAPを作成した。しかし現状の数値解析のメッシュ分解能では、河川の効果の分析には不十分であり、前節で作成したMAPは河川が保有する環境ポテンシャルについては十分に考慮されているとは言えない。河川は河川水自身が冷熱源として周辺大気を冷却するのみならず、河川空間

が風の道として作用し、海風の効果的な活用という観点からも注目を集め、多くの研究がなされている^{文3)}。そこで本研究では仙台市を流れる広瀬川を対象とした温熱環境測定を2010年から2012年の3年間にわたって行った。広瀬川はこれまで調査されてきた他の都市内河川に比べて、①都市中心部で大きく蛇行しており、②発達した河岸段丘を持つなど、特徴的な地形を有している。

(1) 米ヶ袋地区を対象とした短期詳細測定(2010年実施)

(a) 測定概要(図7)

測定は2010年9月26日の9:00~16:00に、仙台駅(市街地中心部)より南西に約1km、海岸線からは北西に約10km離れた米ヶ袋地区にて行った(図6)。川を挟んで米ヶ袋地区側の岸は河川敷で、対岸は崖になっており、高低差は約30mである。図7に米ヶ袋地区での測定点の分布を示す。測定点は河川敷(測定点1)と米ヶ袋地区の道路軸に沿って50~100m間隔に設置した(測定点2~16)。温湿度は全測定点で計測し、河川敷では温湿度のほか、風向・風速の測定を行った。

(b) サーモカメラによる熱画像

図8、9にサーモカメラで撮影した熱画像を示す。図8は河川敷から広瀬川を撮影したもの、図9は測定点12近くの住宅街を撮影したものである。川の表面は、建物壁面や土壌と比較して低温に保たれていることがわかる。住宅地では、日射が当たる部分の道路やブロック塀等の人工被覆の表面温度がとて高くなっている。

(c) 風向変化と道路軸上の気温変化

図10に河川敷(測定点1、測定高さ1.2m)における風向・風速の経時変化を示す。米ヶ袋の河川敷(測定点1)

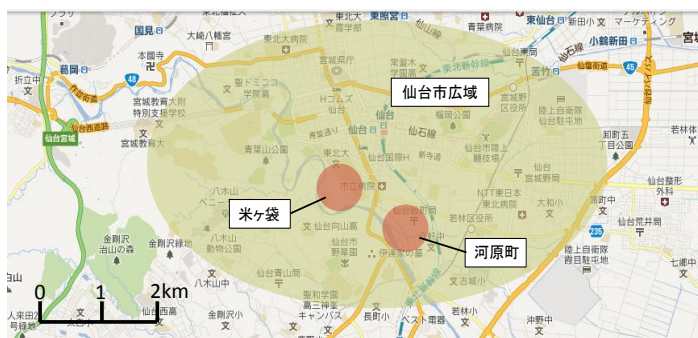


図6 仙台市広域図

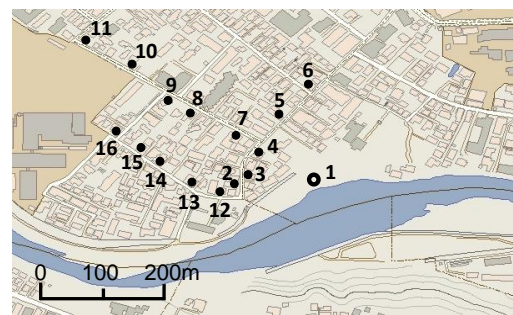


図7 米ヶ袋地区の測定点

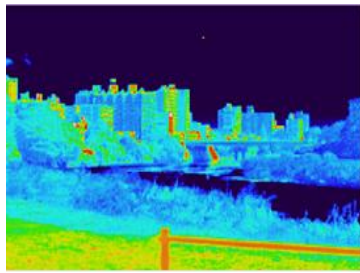


図8 広瀬川の熱画像

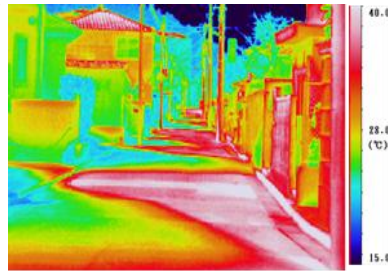


図9 住宅街の熱画像

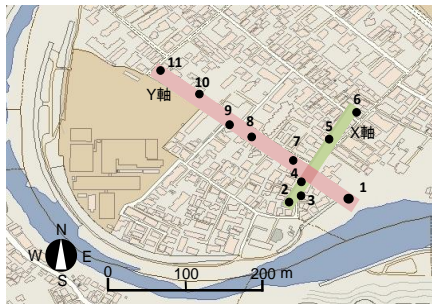


図11 x軸、y軸の定義

の風向は、9時から10時にかけてほぼ南西であるが、10時30分頃からは南東から東へと変化している。南東風は仙台市における夏季日中の卓越風向であり、風向が南東寄りになり、風速の増加が始まる10時30分頃には、海風が米ヶ袋地区に到達し始めていると推定される。

図11に図7中にx,y軸の定義を示し、図12に午前10時頃から11時頃の間、北東-南西寄りの道路軸(図11の測定点2と6を結んだ道路軸、x軸と定義)と、北西-南東よりの道路軸(図11の測定点1と11を結んだ道路軸、y軸と定義)上の最も広瀬川から離れた測定点である測定点6と測定点11の気温の経時変化を示す。

海風到達前と推定される午前10時の風向は南西であり、x軸の方向と一致している。このときx軸の最も内陸側の測定点である測定点6は、y軸上の測定点11と比較して気温上昇が大きく抑制されていることがわかる。続いて風向が南東方向に変化し始める時間に対応して、このときの風向と道路軸の向きが一致しているy軸の最も内陸側にある測定点11の気温が低下していることがわかる。このことから、道路軸と河川敷の風向が一致する時間では、その道路軸上では河川の冷却効果がより遠くまで及んでいる傾向が認められる。北東-南西よりの道路軸(x軸)では広瀬川から約300m、北西-南東よりの道路軸(y軸)では約450m離れた測定点でも気温上昇が抑えられる様子を確認することが出来た。

(2) 仙台市広域を対象とした長期定点観測(2011年実施)

(a) 測定概要(図13)

測定は2011年8月8日から9月22日の45日間に行い、仙台市内の国道48号線、国道45号線沿い(東西方向)に5点(Point A~Point E)、広瀬川沿い(南東方向)に点(Point A, Point F~Point K)の計11か所に温湿度計を設置した。図13に測定機材設置場所を示す。

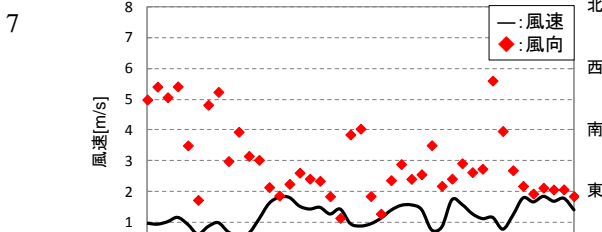


図10 風速風向の経時変化

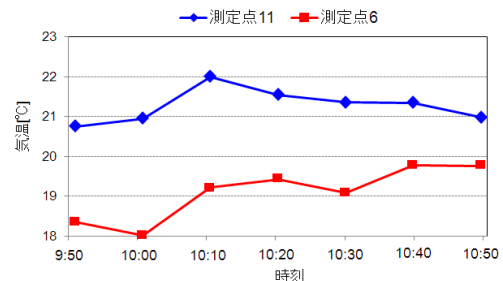


図12 気温の経時変化



図13 測定点の分布

(b) 測定結果

測定期間の中で、天候に恵まれ、かつ日中の主風向が西寄りと南東寄りで異なる8月12日と13日の仙台管区気象台における風速・風向の経時変化をそれぞれ図14と図15に示し、各測定点(Point A,E,K)の気温の経時変化を図16と図17に示す。仙台の夏季卓越風である南東風(海風)が主風向となっている8月13日の気温の経時変化(図17)について、各測定点の気温上昇が緩やかになる時刻を確認すると、測定点E及び測定点Kが10時頃、測定点Aが12時頃となっている。海岸線からの距離は測定点E、測定点Kがともに約7.2kmであるのに対して、測定点Aが約14.4kmと長く、上記の気温変化の傾向の差は海岸線からの距離から説明できる。また海岸線からの距離が等しい測定点であっても、広瀬川周辺に位置する測定点Kの気温の方が、周辺を人工被覆面に覆われている測定点Eの気温よりも日中全体を通して低い値を示しており、最大で4.1℃の差がある。次に日中の主風向が西寄りであった8月12日の気温の経時変化(図16)をみると、日中の気温については最も山側(西側)の測定点である測定点Aの気温が最も低い、測定点Eと測定点Kを比べると広瀬川沿いの測定点Kの方が、市街地内の測定点Eよりも約2℃低い。このように日中に海風が吹いていない日についても、広瀬川周辺では他の市街地内の測定点と比べて一定の気温低下が確認できた。

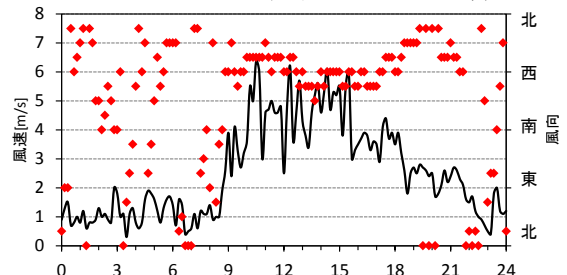


図 14 風速風向の経時変化(仙台管区気象台,8月12日)

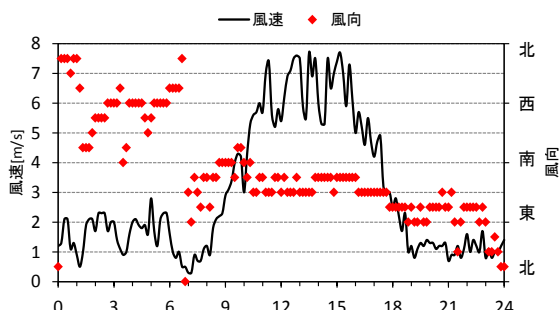


図 15 風速風向の経時変化(仙台管区気象台,8月13日)

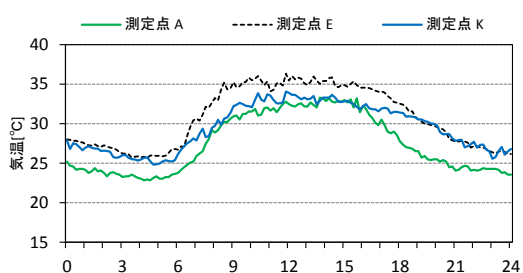


図 16 気温の経時変化(8月12日)

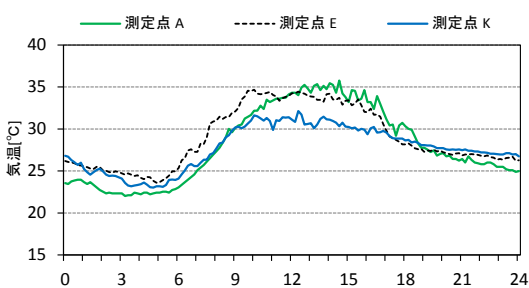


図 17 気温の経時変化(8月13日)

(3)河原町地区を対象とした詳細測定(2012 年実施)

(a)「広瀬川一万人プロジェクト」の方々への成果報告

2012 年 4 月 10 日に本研究により得られた知見を地域住民と共有することを目的として、仙台市の市民団体「広瀬川一万人プロジェクト」の方々へ研究成果を報告した(写真 1)。この報告では過去二年間(2010 年、2011 年)の広瀬川を対象とした温熱環境測定結果について発表し、広瀬川が周辺市街地に対して非常に大きな気温低減効果を有していることを報告し、多くの関心を集めた。また 2011 年度に行った測定に関して、広瀬川との距離が極めて近い測定点であるにもかかわらず測定値が高温となる地域があったことなど、分析上の疑問点についても発表した。これにより住民側から再測定の協力の申し出を得ることができ、2012 年度の河原町地区を対象とした詳細測



写真 1 成果報告会の様子



図 18 測定点分布(河原町地区)

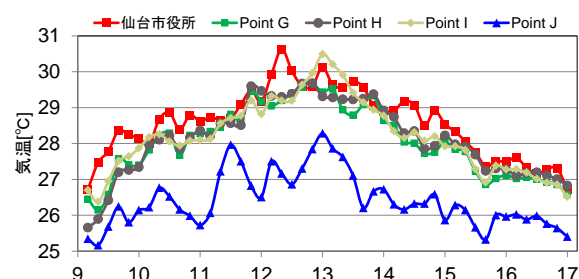


図 19 気温の経時変化(8月5日)

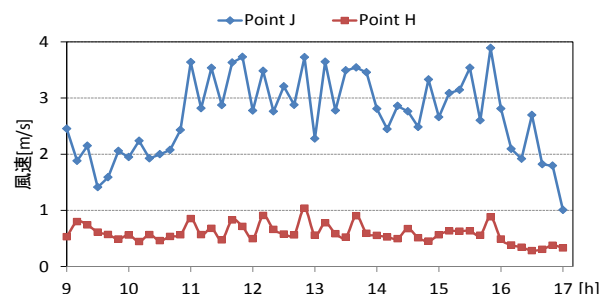


図 20 風速の経時変化(8月5日)

定を行うことが可能となった。

(b) 測定概要(図 18)

測定は2012年8月2日から5日にかけての4日間行った。2011年度の測定で広瀬川周辺地区であるにも関わらず高温値が測定された河原町地区の住宅3件(Point G,H,I)の敷地内にそれぞれ複数点温湿度計を設置した(図 18)。これらの住宅と広瀬川との間に堤防が存在している。また堤防に隣接する建物屋上に測定点を一点設け、上空の温湿度と風速風向を測定した(Point J)。これら広瀬川周辺の測定点との比較のため、河原町地区から約4km離れた仙台の中心市街地に位置する仙台市役所においても温湿度を測定した。

(c) 測定結果

図 19 に 8 月 5 日の仙台市役所と Point G,H,I,J の気温の経時変化を示す。なお Point G,H,I はそれぞれに設置され

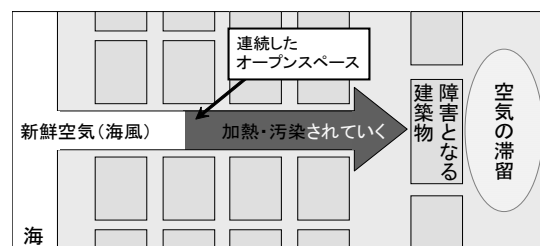
た複数の温湿度計の測定結果を平均化した値である。堤防よりも高位置の測定点(Point J)の気温は日中を通じて他測定点より2.0~3.0℃程気温が低く保たれており、広瀬川の河川空間を流れる冷気の恩恵を受けていることがわかる。それに対して堤防高さより低い位置にある住宅(Point G,H,I)の気温は中心市街地に位置する仙台市役所の気温と同程度であり、広瀬川による冷却効果を十分活かしているとは言えない。

Point Jに対してPoint G,H,Iの気温が高く測定された原因としては、堤防の存在により河川風が遮蔽されているということが推察される。図20にPoint H及びPoint Jにおける風速の経時変化を示す。Point Jでは日中3.0m/s程度の値を示しているのに対して、Point Hでは1.0m/sと非常に低い値を示している。このことから河川周辺の住宅であっても、河川空間との間に堤防等の遮蔽物を介する場合には河川風を効率良く敷地内に引き込むことはできず、中心市街地と同程度の気温になってしまうことがわかる。

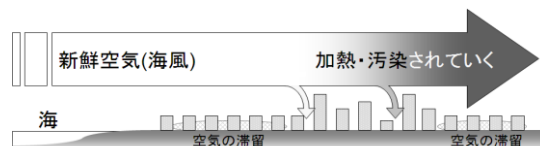
4. 海風・河川風を効果的に活用した都市環境再生手法の検討

(1) ドイツ(内陸都市)の風の道と日本(沿岸都市)の風の道

「風の道」とはドイツのシュツットガルト市の都市計画で採用され注目を集めた概念であり、現在日本でも「風の道」に関する検討が数多く行われている。しかしその多くは海(もしくは河川、緑地)からの新鮮な空気を地表レベルに連続したオープンスペースを設けることにより市街地内に導入する、すなわち「水平方向の風の道」に関するものである。これは、シュツットガルト市で採用された「風の道」の考え方をそのまま日本の都市に応用しようとするものである。しかしこの場合、都市に流入した気流は内陸に進むにつれ暖まり、汚染されてしまうため、その効果は遠くまで及ばない(図21(1))。しかし前述したように、仙台のような沿岸都市では海風による冷却効果の影響が大きい。建物の上空を海風が吹き抜ける沿岸都市においては、「鉛直方向の風の道」(図21(2))を利用して、上空の新鮮空気を地表付近に導入することが可能となれば、都市域の「弱風域」や、水平方向の風の道が適用できない内陸部などにおいても環境改善が期待できる。シュツットガルト市が利用している斜面冷気流の層の厚みは約10m程度といわれているため、高層建物の建設等により、市街地内への冷気の侵入が阻まれる可能性がある。一方、海風の層は斜面冷気流の層と比べて格段に厚みがあり(約500m)、海風は高層建物のほのか上空まで吹き抜けている。仙台のみならず大都市の多くが沿岸部に位置する日本においては、その莫大な冷熱を如何に市街地内へ導入するかが重要なポイントとなる。



(1) 水平方向の風の道(従来のコンセプト)



(2) 鉛直方向の風の道(新しいコンセプト)

図21 風の道の概念図

(2) 建物高さのバラツキによる海風の市街地への導入

これに関連して注目されているのが、建物高さのバラツキである。義江等^{文4)}、上原等^{文5)}により、市街地内の建築物の平均高さが等しい場合、建物高さのバラツキの多い市街地の方が、地表付近の風速が増加することが確認されている。これらの理由として、市街地上空や建物群周辺に生じる鉛直方向の移流や乱流拡散により、鉛直方向の運動量輸送が活発になり、上空の新鮮で冷涼な空気が地表まで輸送されるとともに、地表付近で発生する汚染物質や熱が上空に排出されやすくなるためと考えられる。これらの効果をもたらすものが「鉛直方向の風の道」であり、建物高さのバラツキを始めとする各種要因の及ぼす影響の正確な予測・評価、メカニズムの解明が重要であるといえる。図22に建物高さにバラツキが存在する仙台市街地を対象としたシミュレーション結果を示す。高層建物により上空風が地表面へと吹き下ろされ、地表面付近で低温域が形成されていることが確認できる。この結果から建物高さにバラツキを持たせることで、海風を効果的に市街地に引き込むことが可能であることが示されている。

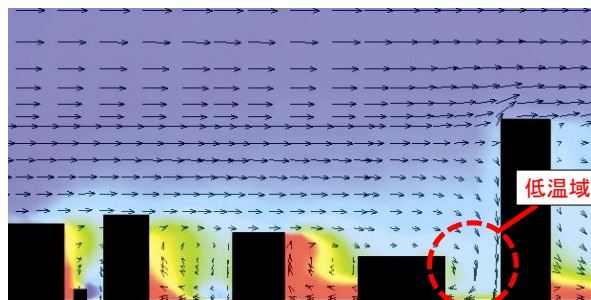


図22 仙台市街地のシミュレーション結果

(3) 河川空間をモデル化した数値シミュレーション

3 節で示した広瀬川を対象とした温熱環境測定結果において、米ヶ袋地区のように河川風を効率良く市街地内に引き込んでいる地区や、河原町地区のように堤防等の遮蔽物により河川風を市街地内に引き込めていない地区が存在することを確認した。ここでは河原町地区に代表されるような河川空間と市街地の間に堤防を挟むような地形をモデル化し、数値シミュレーションを行った。今回は海風の市街地への導入に有効とされる建物高さのバラつきが河川風の導入においても効果的であるかを検討するため、建物高さに変化を与えてシミュレーションを実施した。図 23 に解析結果を示す。図 23(1)は最も堤防寄りの建物の高さを高くした case、図 23(2)は堤防から離れた建物の高さを高くした case である。(1)(2)両 case とも高層建物前方で低温域が確認され、河川空間においても建物高さのバラつきを導入することにより市街地の温熱環境の改善につながりうる事が確認された。

(4) 都市計画への適用

以上のことから沿岸都市はもちろん河川周辺の都市においても「鉛直方向の風の道」によって、その市街地内の風通しは改善されることがわかった。しかしこの場合も「水平方向の風の道」と同様に、そこで上空風の持つ冷熱や運動量が消費され、その風下側の領域の環境が悪化すると考えられることは念頭に置かなければならない。従って、実際の都市計画へ適用する際には、海風により供給される新鮮な空気を都市内のどの地域に導入し、消費するのが一番公正で、合理的であるかという点をよく考える必要がある(図 24)。

5. 本研究の成果

本研究により得られた主な成果は以下の通りである。なお成果の(2)(4)については本稿では省略している。

- (1) 気候数値解析技術により、仙台市内各地域の自然が持つ環境ポテンシャルを定量的に評価した。
- (2) 実測と被験者アンケートから緑陰が人間の温冷感に及ぼす影響を明らかにした。
- (3) 海風を効果的に利用するために、風通しの向上推奨地区 MAP を作成した。
- (4) 以上の結果を基に海風と緑陰の適切な利用という観点から、低木・高木による緑化推奨地区 MAP を作成した。
- (5) 広瀬川を対象とした温熱環境測定を3年間にわたり実施し、海風・広瀬川の冷却効果の影響を明らかにした。
- (6) 海風や河川上を吹く風の効果的な活用による、都市環境の再生手法について検討した。
- (7) 仙台市民の方々へ測定結果の報告や地元住民の方の協力による実測の実施により、本研究により得られた

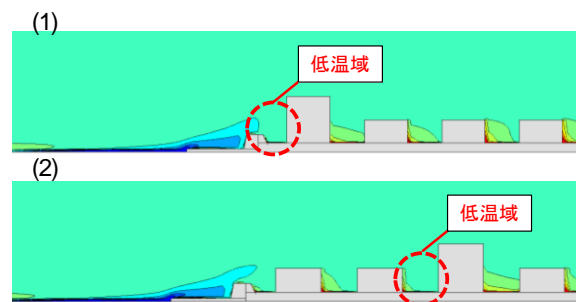


図 23 堤防を有する河川周辺市街地のシミュレーション結果

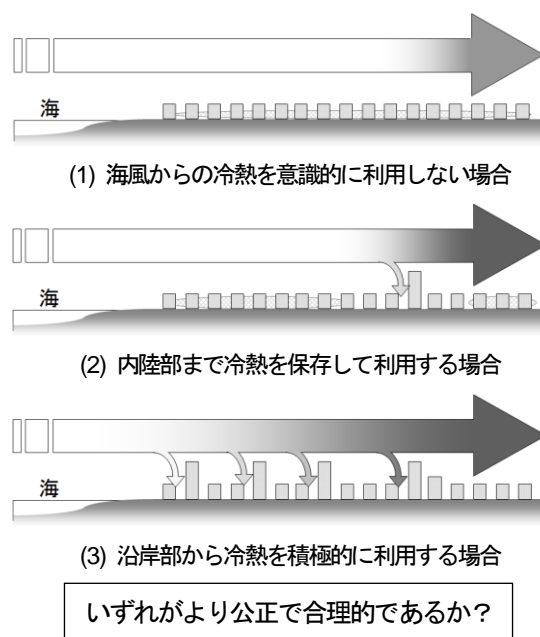


図 24 都市計画としての風の道の選択

広瀬川の気候緩和効果に関する知見を市民、行政の方々と共有することができた。

【謝辞】

本研究を行うにあたり、測定機材の設置などで広瀬川一万人プロジェクト実行委員会には多大なる尽力をいただいた。ここに記して感謝の意を表すものである。

【参考文献】

- 1) 大岡龍三、吉田伸治、村上周三、佐々木澄、持田灯、吉野博：、日本建築学会環境系論文集、No.579、pp.73-80、2004.5.
- 2) 佐々木澄、持田灯、吉野博、渡辺浩文、吉田知弘：日本建築学会環境系論文集、No.595、pp.121-128、2005.9.
- 3) 成田他：日本建築学会計画系論文集、第 393 号、1988.11
- 4) 義江他：日本建築学会環境系論文集、第 627 号、pp.661-667、2008.5
- 5) 上原他：大気環境学会誌、第 42 巻、第 5 号、2007